

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.09.007

颗粒活性炭吸附去除藻源有机物特性与机制

罗黎明¹, 丁路明², 周志伟²

(1. 荆门市疾病预防控制中心, 湖北 荆门 448000; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 湖库水源水季节性藻华引发的藻源有机物(AOM)污染给常规水处理工艺带来了严峻挑战。为此,研究了3种颗粒活性炭(GAC)吸附去除AOM的特性,阐明了GAC吸附AOM的作用机制,并探讨了GAC去除AOM与萨旺尼河天然有机物(SRNOM)复合污染物的适用性。结果表明,桃壳、椰壳和杏壳3种GAC都是以<1 nm的微孔为主,其中椰壳炭微孔最多,杏壳炭的中孔和大孔占比最高。杏壳炭吸附AOM的性能最佳,对UV₂₅₄和DOC的最高去除率分别为59.76%和26.71%;pH为6~7的弱酸性条件和35℃水温更利于AOM的去除。GAC对类腐殖质物质和分子质量(MW)为30~100 ku的有机组分吸附效果较好,而对类蛋白质物质和MW<10 ku的有机组分吸附效果较差。GAC吸附过程涉及孔隙填充和C—N键相互化学作用。杏壳炭吸附AOM—SRNOM复合污染物的效果最佳,对UV₂₅₄和DOC的去除率分别为71.62%和38.84%。

关键词: 颗粒活性炭; 吸附特性; 藻源有机物; 深度处理

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)09-0047-07

Adsorption Characteristics and Mechanism of Algal Organic Matter Using Granular Activated Carbon

LUO Liming¹, DING Luming², ZHOU Zhiwei²

(1. Jingmen Municipal Center for Disease Control and Prevention, Jingmen 448000, China;
2. College of Architecture & Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Seasonal algal blooms in reservoir water sources lead to the release of algal organic matter (AOM), posing significant challenges to conventional drinking water treatment processes. This study investigated the characteristics of three granular activated carbons (GACs) for AOM adsorption, elucidated the underlying adsorption mechanisms, and evaluated the applicability of GAC for removing composite pollutants consisting of AOM and Savannah River natural organic matter (SRNOM). The results showed that the three GACs derived from peach shell, coconut shell, and apricot shell were all dominated by micropores smaller than 1 nm. Among them, coconut shell GAC possessed the highest micropore content, whereas apricot shell GAC exhibited the largest proportion of mesopores and macropores. Apricot shell GAC demonstrated the best adsorption performance for AOM, achieving maximum removal efficiencies of 59.76% for UV₂₅₄ and 26.71% for DOC. Weakly acidic conditions with pH of 6–7 and water temperature of 35 °C were found to be more favorable for AOM removal. GAC showed higher adsorption efficiency for humic-like substances and organic fractions within the molecular weight range of 30–100

通信作者: 周志伟 E-mail: hubeizhouzhiwei@163.com

ku, while the removal of protein-like substances and organic fractions smaller than 10 ku was relatively limited. The adsorption process involved pore-filling effects and chemical interactions associated with C—N bonds. Apricot shell GAC exhibited the highest adsorption efficiency for AOM—SRNOM composite pollutants, achieving removal efficiencies of 71.62% for UV_{254} and 38.84% for DOC.

Keywords: granular activated carbon; adsorption characteristics; algal organic matter; advanced water treatment

我国饮用水源水季节性藻华引发的藻源有机物(AOM)污染给常规饮用水处理工艺(混凝-沉淀-过滤-消毒)带来了严峻挑战。AOM主要来源于藻细胞的新陈代谢、细胞死亡以及水处理过程中的裂解释放,包含单糖、多糖、含氮化合物(如氨基酸、肽、蛋白质和核酸)、脂质和有机酸、臭味物质、藻毒素以及不同分子质量(MW)的难降解有机物,其中臭味物质、藻毒素不仅直接影响水体感官性状,还会威胁人体健康^[1]。常规饮用水处理工艺对AOM的去除效果通常较差,亟须通过深度处理技术,如生物活性炭(BAC)、膜滤技术来保障供水安全。以多孔结构颗粒活性炭(GAC)为介质的BAC主要通过吸附和微生物降解去除水中的有机污染物。BAC运行初期以吸附为主,随着运行时间的延长,吸附位点逐渐被占据,吸附和微生物降解同时发生,直至微生物降解起主导作用。因此,选择合适的GAC对于BAC吸附和后续微生物降解至关重要。本研究考察了3种不同理化特性GAC(桃壳炭、椰壳炭和杏壳炭)吸附去除AOM的性能,明确了 UV_{254} 、溶解性有机碳(DOC)、有机荧光组分和不同分子质量有机组分的去除规律以及GAC理化特性的变化,阐明了GAC吸附AOM的作用机制,并探讨了GAC去除AOM与萨旺尼河天然有机物(SRNOM)复合污染物的适用性。

1 材料与方法

1.1 试验材料与水样

试验选择了3种商用GAC,材质分别为桃壳、椰壳和杏壳,粒度为8~30目,碘值分别为650、1 050和970 mg/g。试验所用铜绿微囊藻购自中国科学院武汉水生生物研究所淡水藻种库(编号为FACHB-905),采用BG11培养基在25℃恒温下培养,1 000~2 000 lx光照12 h、黑暗12 h,每天手动摇动2~3次。将培养至稳定生长期(28~35 d)的铜绿微囊藻液置于50 mL离心管中,在离心机中以8 000 r/min离心

20 min,收集上清液,将上清液用0.45 μm醋酸纤维素膜过滤,所得滤液为藻类细胞外有机物(EOM);使用去离子水将离心沉淀物重新悬浮,再离心,重复清洗3次,获得藻细胞悬浮液,将其放置冰箱中冻融3次,再超声30 min,最后通过0.45 μm醋酸纤维素膜过滤,所得滤液为藻类细胞内有机物(IOM)。将IOM和EOM的储备液以3:1的DOC浓度比加入至一定量纯水中,配制AOM模拟水样,其 UV_{254} 为 $(0.023 \pm 0.002) \text{ cm}^{-1}$ 、DOC浓度约为1.7 mg/L。将AOM模拟水样放于4℃冰箱中储存备用,一周内使用完毕。此外,将AOM与SRNOM按照1:1的DOC浓度比配制复合污染模拟水样,其 UV_{254} 为 $(0.076 \pm 0.004) \text{ cm}^{-1}$ 、DOC浓度约为1.7 mg/L。

1.2 试验方法

1.2.1 吸附试验

将5 g/L的GAC加入到DOC浓度为1.7 mg/L的AOM水样中,在25℃、150 r/min下振荡吸附,在设定的时间间隔(0、15、30、45、60、90、120、180、240、360 min)取样,测定 UV_{254} 和DOC指标。

取不同GAC投加量(1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 g/L),在25℃、150 r/min下振荡吸附DOC为1.7 mg/L的AOM水样,吸附6 h达到平衡后取样,测定 UV_{254} 和DOC指标。

1.2.2 影响因素试验

分别在不同初始pH(6、7、8、9)和温度(25、30、35℃)条件下,用5 g/L的GAC吸附DOC为1.7 mg/L的AOM模拟水样,吸附6 h达到平衡后取样,测定 UV_{254} 和DOC指标,考察pH和温度对GAC吸附去除AOM的影响。其中,AOM水样的初始pH采用0.1 mol/L的HCl和NaOH溶液调整。

1.2.3 吸附作用机制试验

与吸附试验操作条件一致,使用5 g/L的GAC吸附DOC为1.7 mg/L的AOM模拟水样,吸附6 h达到平衡后取样,分析水样的溶解性有机物荧光类型

和有机物分子质量分布特征,同时表征 GAC 吸附 AOM 后的孔隙结构特征和表面官能团变化规律,以探究 GAC 吸附 AOM 的作用机制。

1.2.4 适用性试验

与吸附试验操作条件一致,使用 5 g/L 的 GAC 吸附 DOC 为 1.7 mg/L 的 AOM-SRNOM 复合污染模拟水样,吸附 6 h 达到平衡后取样,测定 UV_{254} 、DOC 和溶解性有机物荧光类型,以探究 GAC 吸附 AOM-SRNOM 复合污染物的适用性。

1.3 检测方法

GAC 的表面元素和化学官能团采用 X 射线光电子能谱仪(XPS)测定;GAC 的比表面积和孔隙结构采用 BET 比表面积和孔径分析仪测定。

采用紫外分光光度计测定 UV_{254} ,采用总有机碳分析仪测定 DOC,水样经 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤后再测试。采用荧光光谱仪检测水样中溶解性有机物荧光类型,利用 MATLAB 中的 DOMFlour 工具箱对荧光光谱数据进行平行因子分析,通过二分法和随机赋值检验得到有效荧光组分数量和各荧光组分的最大荧光强度 F_{max} 。将 100、30、10 和 3 ku 的超滤平板膜(Millipore,美国)置于超滤杯对水样进行分子质量分级,测定 >100、30~100、10~30、3~10 和 <3 ku 分子质量区间的 DOC 浓度,进而确定有机组分分子质量分布特征。

2 结果与分析

2.1 GAC 理化特性

图 1 为 3 种 GAC 的氮气吸附-脱附等温线和孔径分布曲线。由图 1(a)可知,当相对压力(P/P_0)为 0~0.1 时,氮气吸附量均急剧增加,3 种 GAC 均存在丰富的微孔结构(2 nm),且椰壳炭最丰富,杏壳炭次之,桃壳炭最少。当 P/P_0 为 0.4~1.0 时,出现 H4 型吸附回滞环现象,即 GAC 出现毛细凝聚吸附作用,说明 GAC 中包含介孔结构(2~50 nm)。杏壳炭的回滞环最大,说明其孔径类型最丰富。由图 1(b)可知,3 种 GAC 的孔径主要为 <1 nm 的微孔;其次是介孔,其中杏壳炭的介孔最多;杏壳炭和椰壳炭具有极少量的大孔(>50 nm),而桃壳炭几乎没有大孔。桃壳炭、椰壳炭和杏壳炭的 BET 比表面积分别为 421.07、1 127.51 和 798.19 m^2/g ,总孔容积分别为 0.196 7、0.524 7 和 0.435 8 cm^3/g 。其中,椰壳炭具有最大的微孔容积(0.427 9 cm^3/g),占总孔容的

81.55%;杏壳炭具有最大的中孔和大孔容积(0.175 9 cm^3/g),占总孔容的 40.36%。3 种 GAC 都具有微孔占主导的孔隙结构,其中椰壳炭的微孔结构最丰富,杏壳炭的中孔和大孔占比最高。

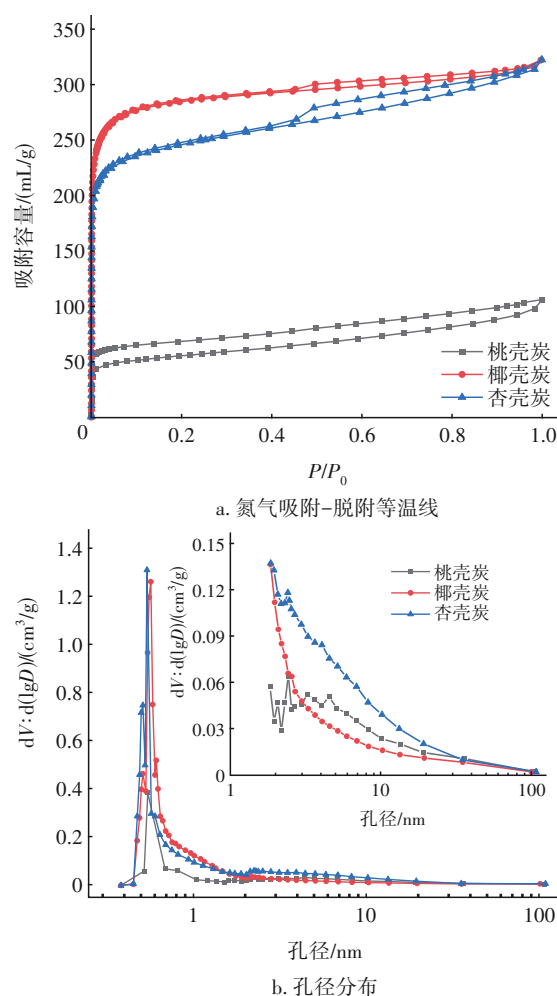


图 1 GAC 的孔隙结构特征

Fig.1 Pore structure characteristics of GAC

通过 XPS 研究 3 种 GAC 吸附前的表面官能团和元素组成,结果见表 1。C 1s 能谱有 4 个明显峰,分别为 C—C/C—H(284.8 eV)、C—O—C/C—N/C—OR(285.4 eV)、O=C—O(288.9 eV)和 C=O(291.1 eV)。O 1s 能谱在 532.1、533.7 和 536.6 eV 处有 3 个明显峰,分别对应 C=O/O—C=O、C—O—C—O 和 —OH。杏壳炭和椰壳炭具有相似的元素组成,桃壳炭含有较少的碳元素和较多的氧元素与氮元素。此外,3 种 GAC 的 O/C 值从大到小依次为:桃壳炭(0.129)>杏壳炭(0.064)>椰壳炭(0.057),桃壳炭的 O/C 值最高,表明其含有的极性官能团最多,对疏水有机污染物的吸附能力最差^[2]。

表1 基于XPS分析的GAC表面官能团和元素组成

Tab.1 Surface functional groups and elemental composition of GAC based on XPS analysis

项目		C 1s				O 1s			元素组成			
		SFG1	SFG2	SFG3	SFG4	SFG5	SFG6	SFG7	C	O	N	S
吸附前	桃壳炭	48.53	36.26	9.71	5.50	37.59	55.23	7.18	86.87	11.24	1.31	0.59
	椰壳炭	45.66	37.77	9.56	7.02	39.94	50.21	9.86	93.85	5.30	0.61	0.24
	杏壳炭	43.15	37.24	10.86	8.75	43.46	42.68	13.86	93.39	5.94	0.30	0.36
吸附后	桃壳炭	44.88	43.36	11.76	0.00	66.33	29.63	4.05	87.98	8.56	2.56	0.89
	椰壳炭	41.91	38.49	10.91	8.69	43.26	47.72	9.03	93.69	5.56	0.66	0.10
	杏壳炭	46.17	37.25	9.83	6.76	46.21	45.93	7.86	92.93	6.09	0.51	0.47

注: SFG1为C—C/C—H, SFG2为C—O—C/C—N/C—OR, SFG3为O=C—O, SFG4为C=O, SFG5为C=O/O—C=O, SFG6为C—O—C—O, SFG7为—OH。

2.2 GAC吸附AOM的效能

图2为3种GAC吸附去除AOM的效能。在0~120 min内,3种GAC在初始阶段有足够多的位点,均能够快速吸附AOM;120 min之后,吸附速率逐渐下降,这是因为GAC有限的孔隙扩散和AOM分子之间的排斥力导致剩余的吸附位点难以被利用^[3];360 min后吸附达到平衡。桃壳炭、椰壳炭和杏壳炭对UV₂₅₄的最高去除率分别为29.70%、51.25%和59.76%,对DOC的最高去除率分别为17.01%、21.81%和26.71%。当吸附360 min达到平衡后,将GAC投加量从5 g/L增至6 g/L,UV₂₅₄和DOC去除率会随之提高,以杏壳炭为例,UV₂₅₄和DOC去除率可分别提高至62.42%和30.69%。

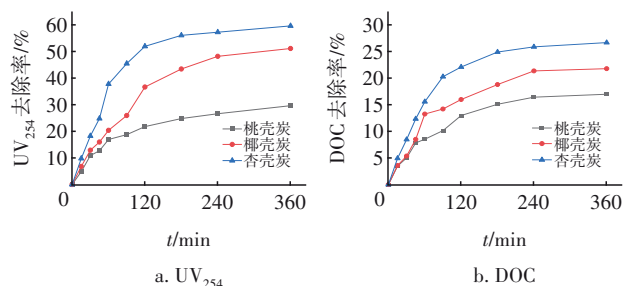


图2 GAC吸附AOM动力学过程

Fig.2 AOM adsorption kinetics of GAC

2.3 GAC吸附AOM的影响因素

图3为不同pH下GAC对AOM的吸附效果。椰壳炭和杏壳炭对UV₂₅₄和DOC的去除率随着pH的增大而呈降低趋势,而桃壳炭在pH为8时对UV₂₅₄和DOC的去除效果最差。pH较高时AOM中羧基和酚基官能团去质子化能力较强,去质子化后pH下降^[4]。因此,低pH时吸附量较高可能是由于GAC表面与AOM中羧基和酚基之间的静电吸引,以及GAC表面与中性化合物之间的疏水相互作用^[5]。

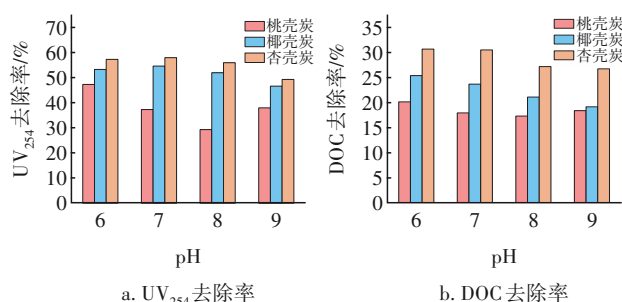


图3 pH对GAC吸附性能的影响

Fig.3 Effect of pH on adsorption properties of GAC

在25、30、35℃这3种温度条件下,3种GAC对DOC和UV₂₅₄的去除率均随着温度的升高而升高,说明GAC吸附AOM为吸热过程。在较低温度下,有机物分子以较大的聚集体形式存在,进而影响吸附效果;在较高温度下,有机物分子的传质速率会加快,可以更容易扩散到GAC活性位点,进而提高吸附效果。因此,较高的温度有利于GAC吸附去除AOM。

2.4 GAC吸附AOM的作用机制

2.4.1 荧光有机物去除特性

GAC吸附前后AOM的三维荧光光谱如图4所示。按照IOM:EOM=3:1配制的AOM主要包括酪氨酸类蛋白质(I区)、色氨酸类蛋白质(II区)、可溶性微生物代谢产物(IV区)和少量类腐殖酸物质(V区)^[6]。3种GAC对类腐殖酸物质的去除效果显著,这可能是因为此类物质分子质量较小,易于被GAC吸附;GAC对酪氨酸、色氨酸类蛋白质和可溶性微生物代谢产物的去除效果一般,这主要是因为类蛋白质物质中含有一些大分子质量物质,如藻蓝蛋白、碳水化合物等^[4],无法被有效吸附到GAC活性位点。3种GAC吸附去除AOM的荧光基团差异性不明显。

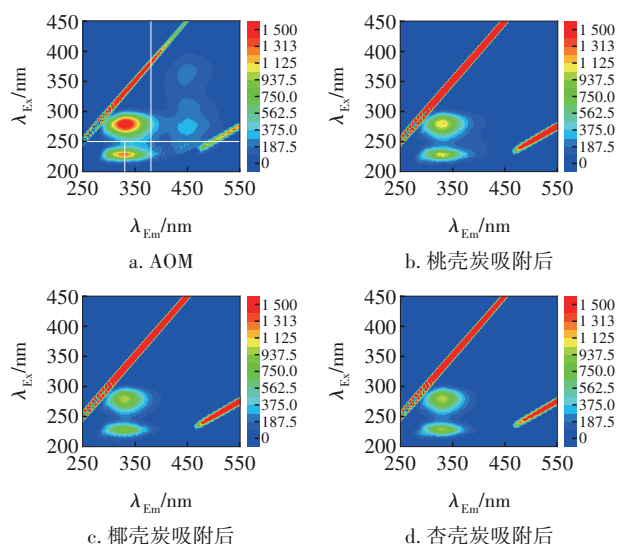


图4 GAC吸附前后AOM的三维荧光光谱

Fig.4 Three-dimensional fluorescence spectra of AOM before and after GAC adsorption

通过平行因子分析法将AOM分为2种荧光组分,激发和发射波长峰所在位置为230(280) nm/330 nm和275(365) nm/450 nm的C1和C2组分分别代表类蛋白质物质和类腐殖质物质。以每种组分的最大荧光值表征其相对浓度,C1和C2组分分别约占83%和17%,桃壳炭、椰壳炭和杏壳炭对C1组分的去除率分别为28.40%、27.30%和35.20%,对C2组分的去除率分别为79.00%、93.40%和97.60%。GAC对AOM中类腐殖质物质的吸附效果较好,而对类蛋白质物质的吸附效果较差。杏壳炭对类腐殖质和类蛋白质均表现出最佳吸附效果。

2.4.2 不同分子质量有机物去除特性

GAC对AOM中不同分子质量有机组分的吸附去除特性如图5所示。可以看出,3种GAC对>100、30~100、10~30 ku这三个分子质量区间有机组分的去除效果均高于对3~10、<3 ku这两个分子质量区间有机组分的去除效果,即3种GAC对高分子质量有机组分的去除效果优于对低分子质量有机组分的去除效果,这可能是因为AOM中MW>10 ku的有机物占68.11%,GAC对水中有机物的快速吸附,导致大分子质量物质快速堵塞吸附孔道,进而影响对小分子质量组分的吸附效果。MW<3 ku有机组分增加了6.46%~8.41%。杏壳炭对>100、30~100、10~30 ku有机组分的去除效果相差不大,分别为40.71%、45.21%和45.60%,而椰壳炭和桃壳炭对30~100 ku有机组分的去除效果较高,分别为

50.21%和47.79%。因此,可以针对AOM中有机组分分子质量分布特征选择合适孔径的GAC来优化污染物去除效果。

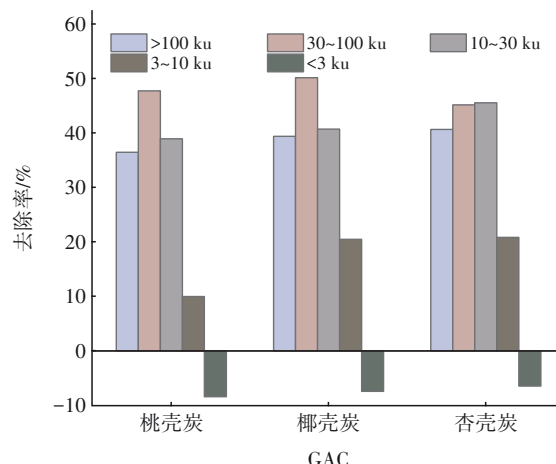


图5 GAC对AOM中不同分子质量有机组分的吸附效能

Fig.5 Adsorption efficiency of GAC for organic components with different molecular weights in AOM

2.4.3 GAC吸附AOM后的理化特性

吸附AOM后,杏壳炭与椰壳炭的中孔和大孔容积分别占总孔容积的36.44%和16.92%,相比吸附前有所减少(吸附前占比为40.36%和18.45%),说明在吸附AOM过程中杏壳炭与椰壳炭的中孔和大孔被占据,这主要是因为AOM中IOM占比较高,其分子质量分布广泛且大分子组分较多。吸附AOM后,桃壳炭的微孔容积占总孔容积的32.77%,相比吸附前大幅减少(吸附前占比为79.31%),说明桃壳炭的微孔在吸附AOM过程中也被充分利用,大量微孔被填充而导致平均孔径大幅上升,这可能是桃壳炭吸附AOM效果最差的原因。

由表1中GAC吸附AOM后表面官能团和元素组成占比可知,桃壳炭和椰壳炭具有相似的变化规律,C 1s能谱中C—C/C—H的含量下降、C—O—C/C—N/C—OR和O=C—O的含量上升,O 1s能谱中C=O/O—C=O的含量上升、C—O—C—O和—OH的含量下降,这说明AOM中的含氮官能团可以很好地吸附在GAC活性位点形成C—N基团,从吸附后氮元素含量的增加也能够证实这一观点。杏壳炭吸附AOM后表现出不同的官能团含量变化规律,O=C—O、C=O和—OH含量下降,说明这些官能团参与了杏壳炭表面化学吸附过程。

综上,AOM主要吸附于杏壳炭、椰壳炭的中孔和大孔,以及椰壳炭和桃壳炭的微孔中,吸附过程

中存在化学反应。吸附后C—N官能团与氮元素含量的增加主要是因为AOM中含氮类物质与GAC表面官能团发生了化学反应。GAC对AOM中类腐殖质物质的吸附效果显著,而对类蛋白质物质的吸附效果一般。GAC对AOM中30~100 ku有机组分的吸附去除效果较好,而对MW<10 ku的有机物吸附去除效果较差。GAC吸附过程中存在大分子物质堵塞吸附孔道的现象,进而影响小分子物质的吸附效果。因此,GAC吸附AOM的过程包括物理吸附和化学吸附作用,其中孔隙填充和化学键的相互作用是吸附过程中主要的作用机制(见图6)。

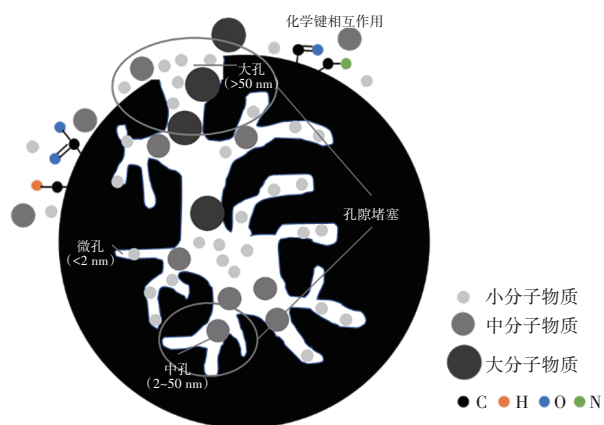


图6 GAC吸附AOM的作用机制示意

Fig.6 Adsorption mechanism of GAC for AOM

2.5 GAC吸附AOM的适用性

针对AOM-SRNOM复合污染物,桃壳炭、椰壳炭和杏壳炭对 UV_{254} 的去除率分别为9.86%、24.57%和71.62%,对DOC的去除率分别为22.67%、27.67%和38.84%。与桃壳炭和椰壳炭相比,杏壳炭对芳香类物质的吸附去除效果最佳。此外,GAC对复合污染物中DOC的去除效果相比AOM均有所提升,表明SRNOM更容易被GAC吸附去除。图7为GAC吸附前后复合污染物的三维荧光光谱。SRNOM的存在导致类腐殖酸物质(V区)和富里酸物质(Ⅲ区)增加。对于AOM-SRNOM复合污染物,杏壳炭仍保持最优的去除效果,尤其是对类腐殖酸物质的去除效果显著,类蛋白质物质的荧光强度也有明显的减弱;椰壳炭主要吸附去除类腐殖酸物质;经桃壳炭吸附后,类蛋白质物质明显减少,但对类腐殖酸物质的去除效果较差。

利用平行因子分析得到AOM-SRNOM复合污染物的3个荧光组分,激发和发射波长峰位置为230

(280) nm/330 nm、240(305) nm/430 nm和270(340) nm/470 nm的C3、C4和C5组分,分别代表地表水中生物源类蛋白质物质、微生物或海洋类腐殖质物质和陆地衍生的类腐殖质物质。C3主要由大分子和疏水性蛋白质组成,一般与藻类、细菌等微生物活动密切相关,主要来源于AOM。C4、C5与带负电且由芳香族有机化合物组成的类腐殖酸天然有机物有关;与C5相比,C4由分子尺寸更小、疏水性更低的化合物组成^[7]。此外,复合污染物中C3占比为48%,C4和C5总占比约为52%。

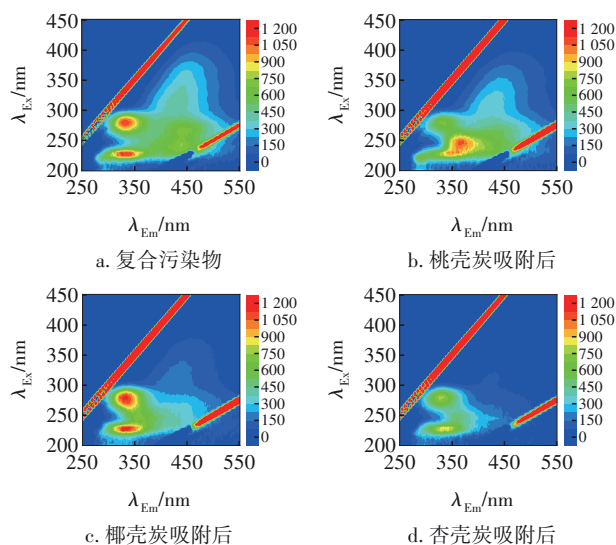


图7 GAC吸附前后AOM-SRNOM复合污染物三维荧光光谱

Fig.7 Three-dimensional fluorescence spectra of AOM-SRNOM before and after GAC adsorption

桃壳炭、椰壳炭和杏壳炭对C3的去除率分别为34%、13%和33%,对C4的去除率分别为7%、56%和80%,对C5的去除率分别为27%、54%和82%。杏壳炭对复合污染物的吸附效果最佳,这同样归因于其丰富的中孔和大孔容积;桃壳炭对C4、C5等类腐殖质物质的吸附效果一般,这可能是因为其优先吸附了类蛋白质物质C3而堵塞了孔径,从而影响了对其有机组分的吸附效果;椰壳炭与桃壳炭相反,对类腐殖质物质有较好的吸附效果,而对类蛋白质物质的吸附效果最差。经GAC吸附后各有机荧光组分的 F_{max} 比值变化进一步表明(见图8),C3与C4以及C3与C5的 F_{max} 比值变化相似,这两个比值可以反映类腐殖酸和类蛋白质组分的相对含量变化。经杏壳炭吸附后 F_{max} 比值最高,椰壳炭次之,桃壳炭最低,表明杏壳炭和椰壳炭吸附降低了类腐

殖酸组分的相对含量,对其表现出更高的吸附亲和性;桃壳炭吸附后 $F_{\max}$ 比值没有显著变化,说明其对类蛋白质和类腐殖酸物质具有相似吸附的亲和性。此外, C4 与 C5 的 $F_{\max}$ 比值无明显变化,表明 3 种 GAC 对这两种物质具有相似的吸附亲和性。

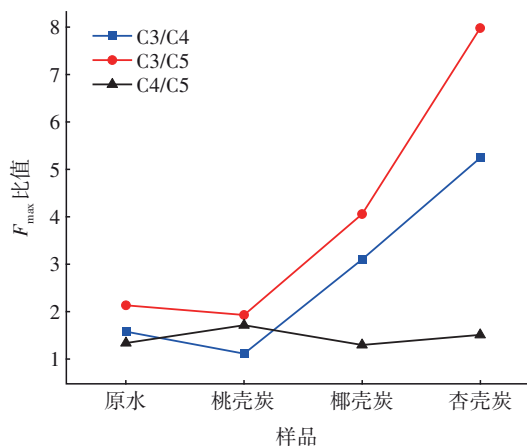


图8 荧光强度比值变化

Fig.8 Change in fluorescence intensity ratio

3 结论

① 3 种 GAC 均以 <1 nm 的微孔结构为主,其中,椰壳炭的微孔结构最丰富,杏壳炭的中孔和大孔容积最大;吸附 AOM 后,椰壳炭、杏壳炭的中孔和大孔容积占比均降低,而桃壳炭的微孔容积占比大幅降低。杏壳炭和椰壳炭的元素组成相似,桃壳炭含有较少的碳及较多的氧和氮元素;吸附 AOM 后,3 种 GAC 的 C—N 官能团和氮元素含量增加。

② 吸附平衡后,杏壳炭对 UV_{254} 和 DOC 的去除率最高,分别为 59.76% 和 26.71%。pH 为 6~7 和 35 °C 水温更利于 GAC 对 AOM 的吸附去除。

③ GAC 对类腐殖质物质的吸附效果较好,对类蛋白质物质的吸附效果较差。杏壳炭对类腐殖质和类蛋白质物质均表现出最佳的吸附效果,去除率分别为 97.60% 和 35.20%。GAC 对 AOM 中 30~100 ku 有机组分的吸附效果较好,而对 MW<10 ku 有机组分的吸附效果较差。GAC 吸附 AOM 的过程包括物理孔隙填充和 C—N 键相互化学作用。

④ 杏壳炭对 AOM—SRNOM 复合污染物的吸附效果最佳,对 UV_{254} 和 DOC 的最高去除率分别为 71.62% 和 38.84%。杏壳炭和椰壳炭倾向于吸附复合污染物中的类腐殖质物质,桃壳炭对类蛋白质和

类腐殖酸物质的吸附能力相当。

参考文献:

- [1] LI L, GAO N, YANG D, et al. Characterization of intracellular & extracellular algae organic matters (AOM) of *Microcystis aeruginosa* and formation of AOM-associated disinfection byproducts and odor & taste compounds [J]. Water Research, 2012, 46(4): 1233–1240.
- [2] FRANZ M, ARAFAT H A, PINTO N G. Effect of chemical surface heterogeneity on the adsorption mechanism of dissolved aromatics on activated carbon [J]. Carbon, 2000, 38(13): 1807–1819.
- [3] ZHAO Z M, SUN W J, RAY M B. Adsorption isotherms and kinetics for the removal of algal organic matter by granular activated carbon [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150885.
- [4] ZHOU S, SHAO Y, GAO N, et al. Characterization of algal organic matters of *Microcystis aeruginosa*: biodegradability, DBP formation and membrane fouling potential [J]. Water Research, 2014, 52: 199–207.
- [5] OMRI A, BENZINA M, TRABELSI W, et al. Adsorptive removal of humic acid on activated carbon prepared from almond shell: approach for the treatment of industrial phosphoric acid solution [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(10/12): 2241–2252.
- [6] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, et al. Fluorescence excitation–emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science and Technology, 2003, 37(24): 5701–5710.
- [7] SHAO S, LIANG H, QU F, et al. Fluorescent natural organic matter fractions responsible for ultrafiltration membrane fouling: identification by adsorption pretreatment coupled with parallel factor analysis of excitation–emission matrices [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 464: 33–42.

作者简介:罗黎明(1974—),男,湖北荆门人,本科,副主任技师,科长,研究方向为水质检测、水处理技术。

E-mail: 156416842@qq.com

收稿日期:2025-03-14

修回日期:2025-05-14

(编辑:刘贵春)